Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 36, 4, 2023. (35-54)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Dynamic Analysis of Concrete Rectangular Ground Tanks equipped with Base Isolators due to Transitional and Rotational Components of Earthquakes

Research Article

Leila Kalani Sarokolayi[1], Leila Khanmohammadi[2], Bahram Navayi Neya[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.80361.1206

1. Introduction

Ground water tanks that are built in buried and semi-buried ways are used for storing water to be used during peak consumption in urban water supply networks. The immediate and continuous use of these structures after the earthquake is so important, so that their importance coefficient is 1.4 in Iranian 2800 standard of seismic provision. Therefore, reducing the seismic demand by using isolators at the base level can be considered as one of the new methods of retrofitting these structures. Modeling the fluid and the effects of fluid-structure interaction, close to the reality modeling of ground motions by considering the simultaneous effect of transitional and rotational components during an earthquake and controlling the performance of additional parts such as isolators are the important issues that should be carefully considered and examined in the seismic behavior of such structures.

2. Method

To model and analyze rectangular ground water tanks, the finite element method was used in Ansys software with the capability of 3D modeling of the tank and water, taking into account the effects of their dynamic interaction and the capability of modeling the nonlinear behavior of tank and isolator materials. The tanks were modeled and analyzed in two different volumes of 500 and 1000 m^3 in three empty, half-full, and full states, with and without base isolators. The behavior of water and concrete of tank is assumed to be linear, but the nonlinear behavior of the isolators in the finite element model is considered bilinear with an initial stiffness of about 9 to 16 times of after yielding stiffness. In the initial part of this research, the behavior of the lead-rubber base isolator under cyclic loading was investigated through a three-dimensional finite element model. For this purpose, the rubber’s inelastic behavior model was simulated using a suitable hyperelastic model based on Ogden’s criterion with the ability to consider large strains. Since 9 lead-rubber base isolators are used in modeling the ground rectangular tank, to reduce the number of elements in the main model of the tank, an equivalent one-dimensional model, consisting of a two-node linear elastic combination element in the vertical direction and two two-node link elements in two horizontal directions, are proposed. The values of stiffness and strength of these elements are chosen in such a way that whose hysteresis behavior is equivalent to the behavior of the three-dimensional model of base isolators. Figure 1 shows the geometrical properties of the lead-rubber base isolators and their placement at the base level of the ground tank.

In order to measure the simultaneous effect of the translational and rotational components of earthquakes on the dynamic response of concrete rectangular ground tanks equipped with isolators, far-field ground motions were selected and by simultaneously using the relations of wave propagation theory and the classical relations of elasticity theory, their corresponding rotational components were produced by coding in MATLAB software. The validation of the program written in MATLAB to produce the rotational components was also checked using the available recorded data. The effects of fluid-structure interaction in the finite element model of water storage tanks were modeled using the Lagrangian-Lagrangian method. Moreover, the accuracy of finite element model was investigated using existing experimental models**.**

3. Results

The results show that the presence of the isolator increases the maximum horizontal displacement of the rectangular ground tanks. The amount of this increase is different according to the type of earthquake and the amount of water inside the tank. The lowest increase in displacement occurred when the tanks were half full. This issue can be attributed to the effects of surface waves created in the half-full state and the fluctuating pressures caused by the impact of the wave on the tank wall. Moreover, by increasing the volume of the tank from 500 to 1000 m^3, the

*Manuscript received January 4, 2023, Revised, May 13, 2023, Accepted, November 10, 2023.

[1]. Assistant professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tabari University, Babol

[2]. Assistant professor, Deptartment of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

[3]. Corresponding author, Professor, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol.

Email: navayi@nit.ac.ir

horizontal displacement of the tanks with the presence of the base isolator decreased. Also, the results show that the presence of the base isolators in all investigated cases of the rectangular ground tank causes an increase in the values of the base shear force and the uplift stress of the tanks. Since the isolators reduce the response of the structures by increasing their damping ratio and periods, the above results can be attributed to the low initial period of the ground tanks which place in the first part of the 2800 standard acceleration response spectrum. Figure 2 illustrates an example of the comparison of the results of the time history of base shear and uplift stress of tanks with and without the presence base isolators. The results also show that the decreasing or increasing effect of rotational components of earthquakes on the seismic response of ground tanks is very small, and in general, its effect on the seismic response of rectangular ground tanks can be ignored.

4. Conclusion

The results showed that the impact of the rotational components of the earthquakes on the seismic response of the ground water storage tanks in the full and half-full states is less than 10% and in general, its effect on the seismic response of the rectangular ground tanks can be ignored. Moreover, the use of the base isolators in this type of tanks increased the response of the tanks in all the investigated cases, so that the base shear force increased up to 4 times and the uplift stress increased between 8 to 23 times. This result can be attributed to the increase in the period of the ground tanks from the initial range of the response spectrum to the constant acceleration region of the spectrum due to the presence of the base isolators. Therefore, using base isolator in these types of structures that have a very small period can cause inappropriate effects.

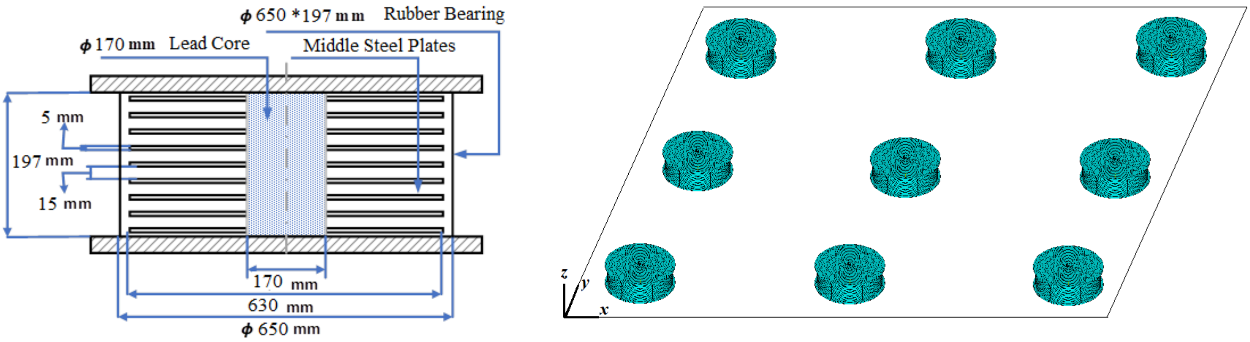


Figure 1. Geometrical properties of lead-rubber base isolators and their placement in the base level of the tank

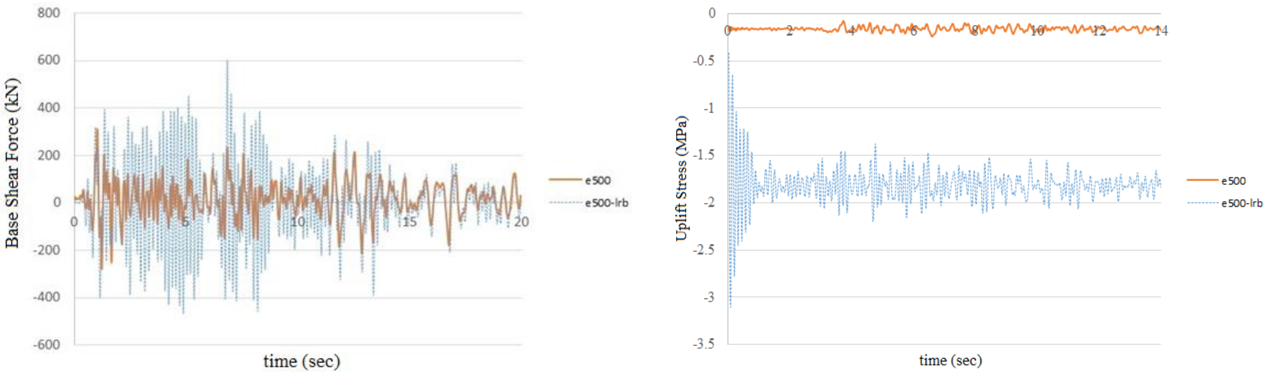


Figure 2. Comparison of base shear force and uplift stress in cases with and without base isolators

مهندسی عمران فردوسی، ۳۶، ۴، ۱۴۰۲. (۳۵-۵۴)

انجمن مهندسی روسازی ایران
انجمن بتن ایران
مهندسی عمران فردوسی
https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/
دانشگاه فردوسی مشهد

تحلیل مخازن زمینی مکعبی بتنی با جداساز پایه تحت مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله*

مقاله پژوهشی

لیلا کلانی ساروکلایی(۱) لیلا خان محمدی(۲) بهرام نوائی نیا(۳)

DOI:10.22067/jfcei.2023.80361.1206

چکیده در این پژوهش رفتار مخازن بتنی زمینی مکعبی مجهز به جداساز پایه هسته سربی، تحت تحریک هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های حوزه دور از گسل با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی با احتساب اندرکنش آب و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا مؤلفه دورانی سه زلزله حوزه دور با استفاده هم‌زمان از تئوری انتشار امواج و روابط تئوری الاستیسیته با کدنویسی در نرم‌افزار متلب تولید شد. سپس مخازن در دو حجم ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمکعب در سه حالت خالی، نیمه‌پر و پر در نرم‌افزار اجزای محدود انسیس مدل‌سازی و از تعداد مناسبی جداساز در تراز کف استفاده گردید. در مدل‌سازی اجزای محدود جداساز، مدلی متشکل از المان‌های یک‌بعدی پیشنهاد و استفاده شده که رفتار هیسترزیس آن معادل رفتار مدل سه‌بعدی جداساز لاستیکی هسته سربی می‌باشد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد اثر کاهشی یا افزایشی مؤلفه دورانی زلزله بر پاسخ لرزه‌ای مخازن زمینی در حالت پر و نیمه‌پر کمتر از ۱۰٪ بوده و در حالت کلی می‌توان از اثر آن بر پاسخ لرزه‌ای مخازن مکعبی زمینی صرف نظر نمود. همچنین به‌کارگیری جداساز در این نوع مخازن سبب افزایش پاسخ مخازن در کلیه حالت‌های مورد بررسی شده است. به طوری که نیروی برش پایه تا ۴ برابر و تنش بلندشدگی بین ۸ الی ۲۳ برابر افزایش یافته که این اثر را می‌توان به افزایش دوره تناوب مخازن زمینی از محدوده ابتدایی طیف پاسخ به ناحیه شتاب ثابت طیف به دلیل حضور جداساز نسبت داد.

واژه‌های کلیدی مخزن مکعبی زمینی، مؤلفه دورانی، جداساز پایه، اندرکنش آب و سازه، تحلیل غیر خطی.

Dynamic Analysis of Concrete Rectangular Ground Tanks equipped with Base Isolators due to Transitional and Rotational Components of Earthquakes

Leila Kalani Sarokolayi Leila Khanmohammadi Bahram Navayi Neya

Abstract In this research, the behavior of concrete rectangular ground tanks equipped with lead-rubber base isolators, under the simultaneous excitation of transitional and rotational components of far-field earthquakes, has been investigated using nonlinear time history analysis including fluid-structure interaction. For this purpose, first, the rotational components of three far-field earthquakes were produced using the wave propagation and elasticity theory relations by coding in MATLAB software. Then, tanks were modeled and analyzed in two different volumes of 500 and 1000 m^3 in three empty, half-full, and full states in Ansys finite element software and an appropriate number of base isolators were used at the base elevation. In the finite element modeling of the base isolator, a model consisting of one-dimensional elements is proposed and used, that whose hysteresis behavior is equivalent to the behavior of the three-dimensional model of the lead-rubber base isolators. The results of the research show that the decreasing or increasing effect of the rotational components of the earthquakes on the seismic response of the ground tanks in full and half-full states is less than 10%, and in general, its effect on the seismic response of the rectangular ground tanks can be ignored. Also, the use of isolators in this type of tanks has increased the response of the tanks in all the examined states. So that the base shear force has increased up to 4 times and the uplift stress has increased between 8 and 23 times, which can be attributed to the increase in the period of ground tanks from the initial range of the response spectrum to the constant acceleration region of the spectrum due to the presence of the base isolator.

Key words Rectangular ground tank, Rotational component, Base isolator, Fluid-Structure interaction, Nonlinear analysis.

* تاریخ دریافت مقاله۱۴۰۱/۱۰/۱۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۱۹ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی طبری، بابل.
(۲) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران.
(۳) نویسندهٔ مسئول، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل.
Email: navayi@nit.ac.ir

مقدمه

مخازن زمینی آب که به دو صورت مدفون و نیمه‌مدفون ساخته می‌شوند به‌منظور ذخیره‌سازی آب برای جبران تغییرات تقاضای آب، کاهش نوسانات فشار آب در شبکه توزیع و همچنین فراهم نمودن آب مورد نیاز اطفای حریق، استمرار آبرسانی در زمان اوج مصرف در شبکه‌های آبرسانی شهری و توزیع آن در هنگام قطع برق و حوادث احتمالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده بی‌وقفه از این سازه‌ها پس از وقوع زلزله اهمیت فراوانی داشته، به طوری که ضریب اهمیت آن‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ ایران حداکثر و برابر ۱/۴ در نظر گرفته می‌شود. پیچیدگی رفتار مخازن به دلیل وجود آب و اثرات اندرکنش دینامیکی آب و سازه از یک سو و ناشناخته بودن مشخصه‌های حرکت زمین در هنگام وقوع زلزله از سوی دیگر توجه بسیاری از محققان را به بررسی رفتار لرزه‌ای این گونه سازه‌ها معطوف نموده است.

هاسکینز [1]، ژاکوبسن [2] و هاوسنر [3] از اولین محققانی بودند که به بررسی رفتار دینامیکی مخازن حاوی سیال پرداختند و الگوهایی متشکل از جرم و فنر را برای در نظر گرفتن اثرات ضربه و نوسان ناشی از حرکت مایع درون مخزن با یک‌سری فرضیات ساده شونده پیشنهاد دادند. با پیشرفت تکنولوژی و استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته اجزای محدود با قابلیت تحلیل غیر خطی و نیز افزایش امکانات آزمایشگاهی، پژوهشگران بسیاری تحلیل دینامیکی خطی و غیر خطی انواع مختلف مخازن زمینی و هوایی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش آب و مخزن و همچنین خاک و مخزن را به روش‌های عددی مورد توجه قرار دادند. در این میان می‌توان به مطالعه تجربی رفتار لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای توسط کلاف و همکاران [4]، طراحی لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات توسط هارون و هاوسنر [5]، بررسی رفتار لرزه‌ای پیچشی مخازن هوایی به منظور توسعه کدهای آیین-نامه‌ای توسط داتا [6]، ارزیابی تقاضای لرزه‌ای مخازن آب هوایی بتن مسلح با و بدون احتساب اثرات اندرکنش آب و سازه و توالی لرزه‌ای توسط شکیب و همکاران [7,8]، بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی بتن مسلح تحت خصوصیات و الگوهای متفاوت زلزله توسط جبار و پاتل [9]، تحلیل دینامیکی مخازن مکعبی بتن مسلح با احتساب اثرات اندرکنش خاک، سازه و سیال توسط خوبانی و همکاران [10]، بررسی حالت‌های خسارت تسلیم و فروریزش مخازن آب هوایی با پایه قاب خمشی بتن مسلح توسط لخاده و کیومار [11]، ارزیابی رفتار دینامیکی مخازن روزمینی انعطاف‌پذیر توسط رحیم‌زاده رفویی [12]، تعیین ضریب رفتار و اثرات شش مؤلفه‌ای حرکت زمین در مخازن آب هوایی توسط کلانی و همکاران [13,14] و بررسی اثر مقطع دیوار و نسبت میرایی بر روی پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن مستطیلی ذخیره آب توسط قدس و اصفهانی [15] اشاره نمود. اثر مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین به هنگام وقوع زلزله بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها و میزان تأثیرپذیری سازه از این مؤلفه‌ها، یکی از مسائلی است که در اکثر آیین نامه‌های طراحی و نیز در تحقیقات گذشته چندان مورد توجه قرار نگرفته است. اما به دلیل اهمیت بررسی اثر مؤلفه‌های دورانی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها از یک طرف و مشکلات ثبت مؤلفه‌های دورانی با دستگاه‌های استاندارد لرزه‌نگاری از طرف دیگر، در سال‌های اخیر به تولید این مؤلفه‌ها با استفاده مؤلفه‌های انتقالی موجود و اعمال آن بر سازه‌های مختلف پرداخته شد. نیومارک [16]، تریفیوناک و همکاران [17,18]، لی و لیانگ [19]، هانگ نان لی و همکاران [20] و سایر محققان با روش‌های مختلف به تولید مؤلفه‌های دورانی با استفاده از تئوری‌های موجود پرداختند که هر یک دارای مزایا و معایبی است. کلانی ساروکلایی و نوایی‌نیا [21] با بررسی و مقایسه پاسخ لرزه‌ای مخازن با و بدون اعمال مؤلفه دورانی زلزله، به این نتیجه رسیدند که مؤلفه‌های دورانی در شرایط خاص می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر پاسخ مخازن داشته باشند. کلانی ساروکلایی [22] به بررسی اثر مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین بر پاسخ غیر خطی سدهای بتنی وزنی پرداخت و نشان داد که مؤلفه دورانی در اکثر مواقع اثر فزاینده و در موارد خاصی اثر کاهنده بر پاسخ این سازه‌ها دارند. آشتیانی و سینگ [23] نشان دادند اثر مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین بر روی سازه‌ها به ویژه سازه‌های بلند می‌تواند بسیار زیاد باشد اما این اثر با افزایش سرعت موج برشی کاهش می‌یابد. هریسچیان و شکیب [24] به بررسی روش‌های تولید مؤلفه‌های دورانی زلزله و ارزیابی اثر آن‌ها بر رفتار سازه‌ها پرداختند و نتیجه گرفتند که میزان مشارکت این مؤلفه‌ها در تحریک لرزه‌ای برخی سازه‌های بلند، می‌تواند به اندازه اثر مؤلفه‌های انتقالی و یا حتی بیشتر از آن باشند. دادپناه [25] تأثیر مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین را در مخازن هوایی بتنی قابی با احتساب اندرکنش سازه، سیال و خاک بررسی نمود و نشان داد که در اکثر مواقع، مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین باعث افزایش

پاسخ تغییر مکان تاج سد و تنش در این نوع مخازن می‌شود. همچنین او نشان داد که مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه نیز می‌تواند در میزان تأثیرگذاری مؤلفه دورانی حرکت زمین بر پاسخ مخزن، تأثیرگذار باشد.

با توجه به اهمیت خدمت‌رسانی مخازن بعد از وقوع زلزله، راهکار کاهش نیاز لرزه‌ای این گونه سازه‌ها نیز در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از روش‌های نوین کاهش نیاز لرزه‌ای، به‌کارگیری جداساز در تراز پایه و یا در نقاط خاصی در ارتفاع سازه می‌باشد. کیم و لی [26] با مطالعه آزمایشگاهی بر روی مخازن مایع جداسازی شده به‌وسیله جداسازهای لاستیکی، کاهش قابل توجهی را در پاسخ دینامیکی مخازن مشاهده نمودند. شنتون و هامپتون [27] به بررسی پاسخ لرزه‌ای مخازن هوایی پرداختند و نتایج مخزن جداسازی شده را با حالت بدون جداساز مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که جداسازی پایه نقش مؤثری بر کاهش پاسخ لرزه‌ای مخازن هوایی به خصوص در حجم‌های کوچک‌تر دارد. شیرمالی و جانگید [28-30] در تحقیقات گسترده‌ای به بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی و زمینی جداسازی شده با انواع جداسازهای الاستومری و لغزشی پرداختند. ایشان در مطالعات خود با صرف نظر از اثرات اندرکنش سازه و سیال، مدل‌سازی سیال داخل مخزن به‌صورت جرم‌های متمرکز و صلب فرض کردن عملکرد جداسازها در جهت قائم، مخازن را تحت تحریک واقعی زلزله بررسی نمودند. نتایج تحقیقات ایشان کاهش قابل توجه پاسخ لرزه‌ای مخازن هوایی با به‌کارگیری جداساز در تراز پایه را نشان می‌دهد. شاکری و همکاران [31]، رفتار لرزه‌ای مخزن استوانه‌ای دارای جداساز پایه را به روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن المان‌های پوسته‌ای برای سازه و اعمال شرایط مرزی برای سیال مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که با به‌کارگیری جداساز، حداکثر نیروی برش پایه کاهش و تأثیر جداساز با افزایش انعطاف‌پذیری آن افزایش می‌یابد. مسلمی و کیانوش [32] تحقیقاتی در خصوص به‌کارگیری جداساز هسته سربی در مخازن بتنی هوایی انجام دادند. تحقیقات ایشان نشان می‌دهد که استفاده از جداساز می‌تواند نقش به سزایی بر کاهش پاسخ این نوع مخازن داشته باشند. علاوه بر این تعداد و محل قرارگیری جداسازها نیز می‌تواند بر پاسخ مخازن تأثیرگذار باشد. کلانی و همکاران [33] به بررسی اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل بر پاسخ لرزه‌ای مخازن بتنی هوایی دارای شافت مرکزی مجهز به جداساز پایه هسته سربی با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال به روش لاگرانژی- لاگرانژی پرداختند. ایشان نشان دادند که افزایش شتاب زاویه‌ای مؤلفه دورانی زلزله‌های حوزه نزدیک، سبب تضعیف اثر کاهشی جداساز پایه بر پاسخ لرزه‌ای مخازن می‌گردد.

با توجه به تحقیقات پیشین، تحلیل دینامیکی غیر خطی مخازن زمینی دارای جداساز پایه با در نظر گرفتن اثر مؤلفه دورانی زلزله و اعمال اثر اندرکنش سازه و سیال مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر، مؤلفه دورانی زلزله‌های دور از گسل با استفاده هم‌زمان از تئوری انتشار امواج و روابط تئوری الاستیسیته تولید می‌شود. در مدل‌سازی اجزای محدود جداسازها نیز مدلی متشکل از المان‌های یک بعدی ارائه شده که رفتار هیسترزیس آن معادل رفتار مدل سه بعدی جداساز لاستیکی هسته سربی می‌باشد. در نهایت پاسخ دینامیکی مخازن زمینی مکعبی بتنی مجهز به جداساز با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه و سیال، تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

روش پژوهش

روش‌های گوناگونی برای حل مسائل اندرکنش جامد و سیال وجود دارد که شامل روش جرم افزوده، روش اویلری- لاگرانژی و روش لاگرانژی- لاگرانژی می‌باشد. روش معمول در مدل‌سازی سازه‌های با تغییر شکل کوچک، روش لاگرانژی می‌باشد. در روش لاگرانژی- لاگرانژی که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است، سرگذشت یک ذره در طول زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد و مجهول مورد نظر در سیال و جامد، تغییر مکان‌های گرهی المان می‌باشد. لذا از فرمول‌بندی واحد در سیال و جامد استفاده می‌شود. در این حالت، معادله دینامیکی حاکم به صورت معادله (۱) بیان می‌شود:

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = P(t) \qquad (۱)$$

که در آن $[M]$،$[C]$ و$[K]$ به‌ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی، $u(t)$ بردار تغییر مکان نسبی سازه و $P(t)$ بردار بار گرهی مؤثر ناشی از زلزله می‌باشد. ماتریس جرم سیستم یک ماتریس قطری بوده که درایه‌های غیر از قطر اصلی آن صفر می‌باشد. ماتریس سختی کل سیستم نیز از سر هم نمودن ماتریس سختی المان‌های سازه و سیال به وجود آمده است. در روش لاگرانژی، به منظور اعمال قید عدم چرخش در المان‌های سیال از ضرایب

جریمه و به منظور جلوگیری از به وجود آمدن سختی کاذب ناشی از آن از تکنیک کاهش نقاط انتگرال‌گیری استفاده می‌شود. علاوه بر این به منظور در نظرگیری اثر امواج سطحی، ماتریس سختی المان‌های سطح سیال به ماتریس سختی کل اضافه می‌گردد. ماتریس میرایی سیستم نیز با استفاده از رابطه (۲) به ماتریس جرم و سختی آن مرتبط می‌شود:

$$[C] = a[M] + b[K] \quad (۲)$$

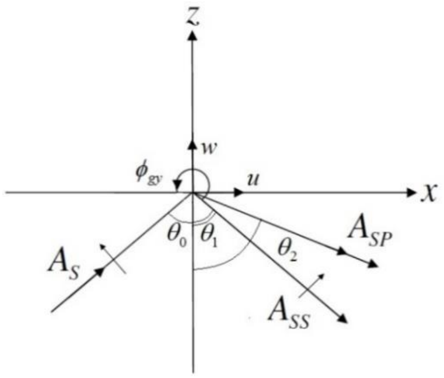
که در آن:

$$a = 2\omega_1\xi_1 - (\omega_1{}^2 b) \quad (۳)$$

$$b = 2\frac{(\xi_1\omega_1 - \xi_2\omega_2)}{(\omega_1{}^2 - \omega_2{}^2)} \quad (۴)$$

در روابط فوق ω_1 و ω_2 شکل مودهای ارتعاشی سیستم و ξ_1 و ξ_2 ضرایب میرایی نظیر آن‌ها می‌باشند که در این پژوهش ۵٪ فرض شده است. برای حل معادله دینامیکی حاکم رابطه (۱) از روش شتاب ثابت نیومارک استفاده شده است.

در پژوهش حاضر، مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین با استفاده از مؤلفه‌های انتقالی آن و همچنین با استفاده هم‌زمان از روابط تئوری الاستیسیته و تئوری انتشار امواج تولید شده است [22]. برای این منظور از تابع پتانسیل حرکت موج S که از مرکز کانونی زمین‌لرزه ساتع و به سمت سطح زمین حرکت می‌نماید استفاده می‌شود. شکل (۱) نحوه برخورد و انتشار موج حادث S با سطح زمین را نشان می‌دهد. در این شکل، A_S دامنه موج حادث، A_{SP} و A_{SS} دامنه امواج بازتاب شده SP و SS و زاویه‌های θ_0، θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویه امواج S، SS و SP با محور قائم z در سطح زمین می‌باشند. همچنین مؤلفه‌های انتقالی u و w و مؤلفه گهواره‌ای نظیر ϕ_{gy} ناشی از انتشار موج حادث S در صفحه $y = 0$ نیز در این شکل نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل (۱) زوایای موج حادث θ_0 و موج SS بازتابیده شده θ_1 با هم برابر و نیز زاویه موج بازتابیده SP برابر θ_2 می‌باشد. برای موج هارمونیک با سرعت زاویه‌ای ω، تابع پتانسیل تغییرمکان حرکت موج بر حسب مختصات مکانی و زمان به صورت روابط (۵) الی (۷) بیان می‌شود [22]:



شکل ۱ نحوه برخورد موج S و انتشار امواج بازتابی ناشی از آن در سطح زمین [22]

$$\psi_S = A_S \exp i\omega\left(\frac{\sin\theta_0}{\beta}x - \frac{\cos\theta_0}{\beta}z - t\right) \quad (۵)$$

$$\varphi_{SP} = A_{SP} \exp i\omega\left(\frac{\sin\theta_1}{\alpha}x + \frac{\cos\theta_1}{\alpha}z - t\right) \quad (۶)$$

$$\psi_{SS} = A_{SS} \exp i\omega\left(\frac{\sin\theta_0}{\beta}x + \frac{\cos\theta_0}{\beta}z - t\right) \quad (۷)$$

که در آن‌ها α و β به ترتیب سرعت انتشار امواج طولی و امواج برشی می‌باشند.

تغییرمکان u و w در سطح زمین با استفاده از روابط (۸) و (۹) برحسب توابع پتانسیل روابط (۵) تا (۷) به‌دست می‌آیند:

$$u = \frac{\partial\varphi_{SP}}{\partial x} + \frac{\partial(\psi_S + \psi_{SS})}{\partial z} \quad (۸)$$

$$w = \frac{\partial\varphi_{SP}}{\partial z} - \frac{\partial(\psi_S + \psi_{SS})}{\partial x} \quad (۹)$$

با استفاده از شرط مرزی تنش برشی صفر در سطح زمین و نیز رابطه کلاسیک تئوری الاستیسیته بین دوران و تغییر مکان، مؤلفه گهواره‌ای حرکت زمین به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\varphi_{gy} = \frac{i\omega}{C_x}w \quad (۱۰)$$

که در آن C_x سرعت ظاهری امواج می‌باشد.

$$C_x = \frac{\beta}{\sin\theta_0} \quad (۱۱)$$

با تغییر متغیر $x = \sin\theta_0$، از روابط (۱۲) و (۱۳) برای محاسبه زاویه موج حادث استفاده می‌شود:

$$G_a = \frac{2x\sqrt{1 - K^2x^2}}{K(1 - 2x^2)} \qquad \theta_0 < \theta_C \quad (۱۲)$$

$$G_a = -\frac{2x\sqrt{K^2x^2-1}}{iK(1-2x^2)} \qquad \theta_0 > \theta_C \qquad (۱۳)$$

که در آن‌ها $G_a = R_w/R_u$ نسبت دامنه مؤلفه قائم به دامنه مؤلفه افقی حرکت زمین، $K = \alpha/\beta$ و $\theta_C = \arcsin(\frac{\beta}{\alpha})$ زاویه بحرانی موج حادث می‌باشد.

به منظور محاسبه تاریخچه زمانی گهواره‌ای حرکت زمین، می‌توان رابطه (۱۰) را به صورت رابطه (۱۴) بازنویسی نمود:

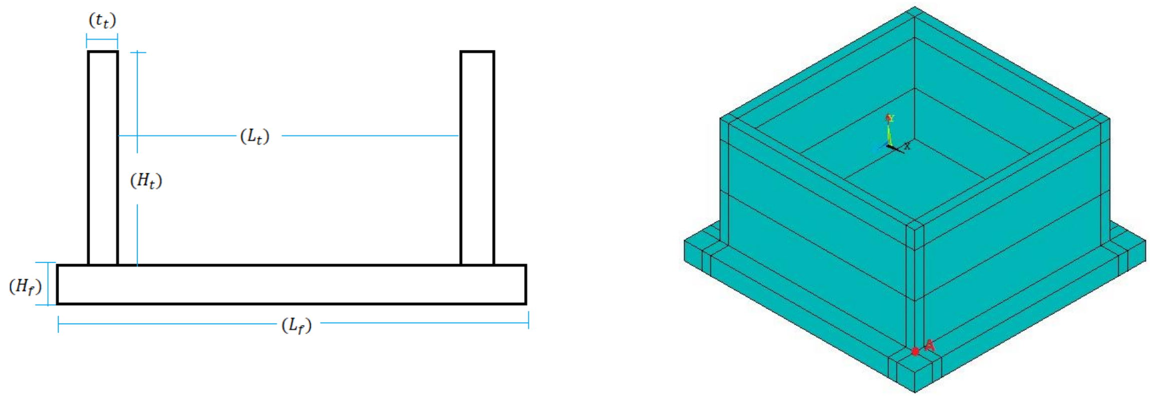
$$\phi_{gy}(t) = (\frac{\omega}{C_x}R_w)(e^{(\frac{\pi}{2}+\theta_w)i}) \qquad (۱۴)$$

در رابطه فوق R_w و θ_w به ترتیب دامنه و فاز فرکانسی مؤلفه قائم حرکت زمین می‌باشند که از طیف محتوای فرکانسی مؤلفه انتقالی w به دست می‌آیند. رابطه (۱۴) نشان می‌دهد که طیف مؤلفه گهواره‌ای دارای دامنه‌ای برابر با $\frac{\omega}{C_x}R_w$ بوده و اختلاف فاز آن‌ها با مؤلفه انتقالی w برابر $\frac{\pi}{2}$ می‌باشد. در پژوهش حاضر جهت تولید مؤلفه دورانی با استفاده از روابط فوق، کدنویسی در نرم‌افزار متلب انجام شده است.

مدل اجزای محدود مخزن، سیال و جداساز لرزه‌ای

در پژوهش حاضر، به منظور مدل‌سازی و تحلیل مخازن مکعبی زمینی از روش اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس (۲۰۱۲) استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی سه بعدی مخزن و آب و لحاظ نمودن اثرات اندرکنش دینامیکی آن‌ها و نیز قابلیت مدل‌سازی رفتار غیر خطی مصالح مخزن و جداساز را داراست. علاوه بر این می‌توان اثر اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی شتاب زمین در مواقع زلزله را در تحلیل تاریخچه زمانی لحاظ نمود.

مخازن مورد بررسی در دو حجم متفاوت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمکعب در سه وضعیت خالی، نیمه‌پر و پر، یک بار با جداساز و بار دیگر بدون جداساز پایه مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. شکل (۲) مدل هندسی مخزن زمینی مکعبی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. پارامترهای هندسی مخازن مورد بررسی نیز در جدول (۱) ارائه شده است. در حالت پر و نیمه‌پر، ارتفاع آب درون مخزن به ترتیب ۵ متر و ۲/۵ متر در نظر گرفته شده و ارتفاع آزاد مخزن ۰/۵ متر فرض شده است.



(الف) (ب)

شکل ۲ مدل مخزن مکعبی زمینی، (الف) مدل سه بعدی، (ب) ابعاد هندسی

جدول ۱ ابعاد هندسی مخازن مکعبی برحسب (m)

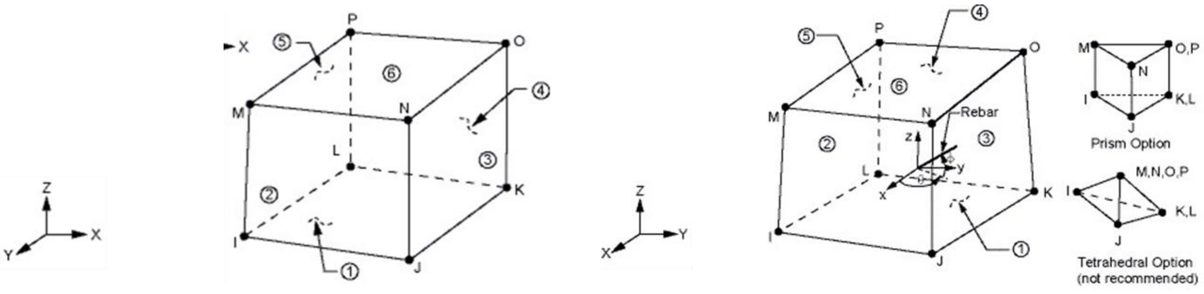
حجم مخزن (m^3)	مخزن			فونداسیون		
	ارتفاع (H_t)	ضلع (L_t)	ضخامت جدار (t_t)	ارتفاع (H_f)	طول (L_f)	عرض (B_f)
۵۰۰	۵/۵	۱۰	۰/۵	۱	۱۱	۱۱
۱۰۰۰	۵/۵	۱۴	۰/۵	۱	۱۵	۱۵

با توجه به مطالعات و تحلیل های اولیه انجام شـــده در پژوهش حاضـر مشـخص گردید که به دلیل حضـور جداسـاز، رفتار مخازن وارد ناحیه غیر خطی نمی‌شـود، بنابراین رفتار بتن مخازن خطی فرض شـده اسـت. دیواره‌های مخزن به صـورت طره‌ای بوده و آب داخل مخزن نیز تراکم‌پذیر و رفتار آن خطی در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح به کار رفته شامل بتن، فولاد و آب در جدول (۲) ارائه شـــده اســـت. به منظور مدل‌سازی اجزای محدود آب، از المان سه بعدی مبتنی بر روش لاگرانژی Fluid80 با هشت گره و سه درجه آزادی در هر گره و قابلیت مدل سازی اثر امواج سطحی و برای مدل سازی مخزن از المان هشت گرهی بتن مسلح SOLID65 با قابلیت مدل سازی فولاد به صورت در صد حجمی استفاده شده است. به منظور اعمال شرط مرزی اندرکنش بین آب و مخزن، نقاط نظیر سازه و سـیال در جهت نرمال با یکدیگر درگیر شـده و در جهت مماس آزادی حرکت در نظر گرفته شـده اسـت. مشـخصـات اجزای محدود المان‌های آب و مخزن در شـکل (۳) نشـان داده شده است.

جداساز لاستیکی هسته سربی شامل یک هسته سربی است که در داخل لایه‌هایی از جنس لاستیک و صفحات فولادی محصور شده است. هسته سربی در جداسازهای لاستیکی با تسلیم شدن در زمان ارتعاش، میزان میرایی را افزایش داده و سختی جانبی اولیه سازه جداسازی شده را تأمین می‌کند. بخش لاستیکی این تجهیزات وظیفه تأمین نیروی بازگرداننده را پس از پایان ارتعاش سازه به عهده دارد و دیسک‌های فولادی بین بخش‌های لاستیکی وظیفه تأمین سختی قائم جداساز را عهده‌دار می‌باشند. رفتار هیسترزیس این جداسازها را می‌توان به صورت دو خطی با سختی اولیه‌ای در حدود ۹ تا ۱۶ برابر سختی پس از تسلیم آن‌ها در نظر گرفت [34]. شکل (۴) رفتار غیر خطی جداساز لاستیکی هسته سربی را نشان می‌دهد.

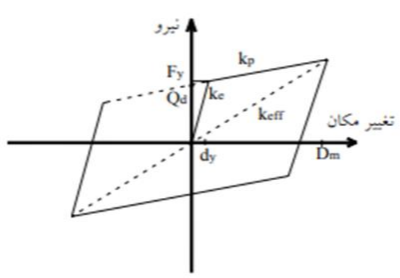
جدول ۲ مشخصات مصالح

مصالح	مدول الاستیسیته/مدول بالک $(N/m^۲)$	جرم حجمی $(kg/m^۳)$	نسبت پواسون
بتن	۲×۱۰^{۱۰}	۲۴۰۰	۰/۲۷
فولاد	۲×۱۰^{۱۱}	۷۸۰۰	۰/۳
آب	$۲/۲ \times ۱۰^{۹}$	۱۰۰۰	–



(الف) (ب)

شکل ۳ مشخصات اجزای محدود: (الف) المان Solid65، (ب) المان Fluid80



شکل ۴ رفتار غیر خطی جداساز لاستیکی با هسته سربی [34]

در مرحله اولیه این پژوهش، رفتار جداساز لاستیکی هسته سربی تحت بارگذاری چرخه‌ای از طریق یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی دقیق مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مدل رفتاری لاستیک با استفاده از یک مدل هایپرالاستیک مناسب بر اساس معیار اوگدن با قابلیت در نظر گرفتن کرنش‌های بزرگ شبیه‌سازی شد [35,36]. در این پژوهش از مدل انرژی پتانسیل کرنشی اوگدن مرتبه ۳ استفاده شده است که به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود:

$$W = \sum_{i=1}^{3} \frac{\mu_i}{\alpha_i}\left(\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3\right) + \sum_{k=1}^{3} \frac{1}{d_k}(J-1)^{2k}$$
(۱۵)

که در آن $\bar{\lambda}$ مقادیر کرنش‌های اصلی بوده و پارامترهای α و μ ثابت‌های مواد لاستیکی هستند که از داده‌های تجربی تنش-کرنش به‌دست می‌آیند. در پژوهش حاضر، مقادیر بهینه این ثابت‌ها بر اساس مراجع [37,38] در جدول (۳) آورده شده است. پارامتر J نسبت حجم تغییر شکل یافته به حجم اولیه لاستیک است که با توجه به فرض تراکم‌ناپذیری برای لاستیک هایپر، مقدار این پارامتر، یک در نظر گرفته شده و عبارت دوم رابطه (۱۵) در محاسبات بی‌تأثیر خواهد شد. برای مدل سازی اجزای محدود سه بعدی هسته سربی، فولاد و لاستیک از المان Solid185 با قابلیت مدل‌سازی رفتارهای پلاستیک و هایپر الاستیک استفاده شده است. رفتار غیر خطی فولاد و سرب نیز با استفاده از مدل الاستوپلاستیک دوخطی بر اساس معیار تسلیم فون میزس و خواص مصالح فولادی، سرب و لاستیک بر اساس مقادیر جدول (۴) در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر به منظور کاهش حجم محاسبات، برای مدل سازی اجزای محدود هر جداساز هسته سربی، المان‌های یک بعدی معادل با جداساز استوانه‌ای سه بعدی مرجع [32] ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل معادل، به صورت ترکیبی از یک المان فنر الاستیک خطی دو گرهی COMBIN14 در جهت قائم و دو المان میله دو گرهی LINK180 در دو راستای افقی در نظر گرفته شده است. مقادیر سختی و مقاومت تسلیم این المان‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که رفتار هیسترزیس مدل معادل ارائه شده با رفتار مدل سه بعدی جدا ساز هسته سربی مطابقت داشته باشد. بدین منظور، برای المان COMBIN14 مقدار سختی قائم $K_v = ۶۰۰$ kN/mm و برای المان LINK180 نیروی مقاوم تسلیم $Q_y = ۲۲۴$ kN، سختی الاستیک $K_e = ۱۷$ kN/mm و سختی پلاستیک $K_p = ۲$ kN/mm انتخاب گردید. اثر افزایش میرایی ناشی از حضور جداساز با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی جداساز مطابق شکل (۴) به صورت میرایی هیسترزیس در ماتریس میرایی لحاظ خواهد شد. ابعاد هندسی جداساز استوانه‌ای سه بعدی و مدل اجزای محدود دو بعدی پیشنهادی پژوهش حاضر در شکل (۵) و جانمایی جداسازها در کف مخزن در شکل (۶) نشان داده شده است.

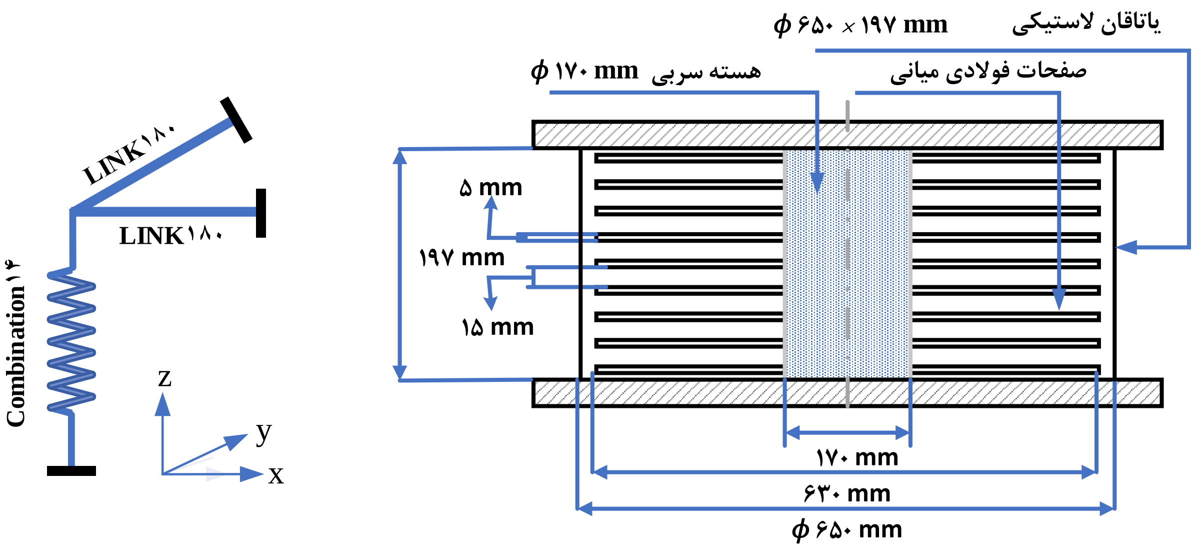
شکل (۷) مدل اجزای محدود مخزن زمینی مکعبی را در دو حالت مخزن خالی با تکیه‌گاه صلب و مخزن پر جداسازی شده نشان می‌دهد. در شکل (۷-الف) گره‌های زیر فونداسیون مخزن گیردار در نظر گرفته شده و در شکل (۷-ب) در ۹ نقطه در زیر فونداسیون از المان‌های میله و فنر معادل به منظور مدل‌سازی جداساز استفاده شده است.

جدول ۳ مقادیر بهینه ثابت‌های لاستیک (pa) با استفاده هم‌زمان از سه داده تجربی [37,38]

μ_3	α_3	μ_2	α_2	μ_1	α_1
۱۸۸	۵/۹۳	-۲۱۶۳۴	-۱/۷۸	۴۸۳۳۸۷	۱/۵۲

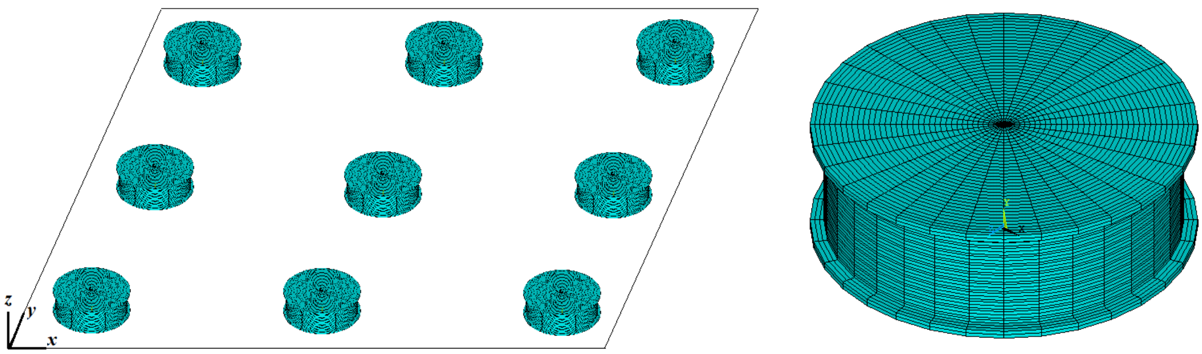
جدول ۴ مشخصات مصالح جداساز هسته سربی [32]

مصالح	مدول الاستیسیته/مدول برشی (N/m²)	تنش تسلیم (N/m²)	مدول مماسی (N/m²)	جرم حجمی (kg/m³)	نسبت پواسون
سرب	$۱/۶\times۱۰^{۱۰}$	$۱/۲\times۱۰^{۷}$	$۴/۵\times۱۰^{۷}$	۱۱۳۰۰	۰/۴۴
فولاد	$۲/۰۵\times۱۰^{۱۱}$	$۲/۷۵\times۱۰^{۸}$	$۲/۰۵\times۱۰^{۱۰}$	۷۸۵۰	۰/۲۸
لاستیک	$۳/۹\times۱۰^{۵}$	-	-	۱۱۵۰	۰/۴۹۹



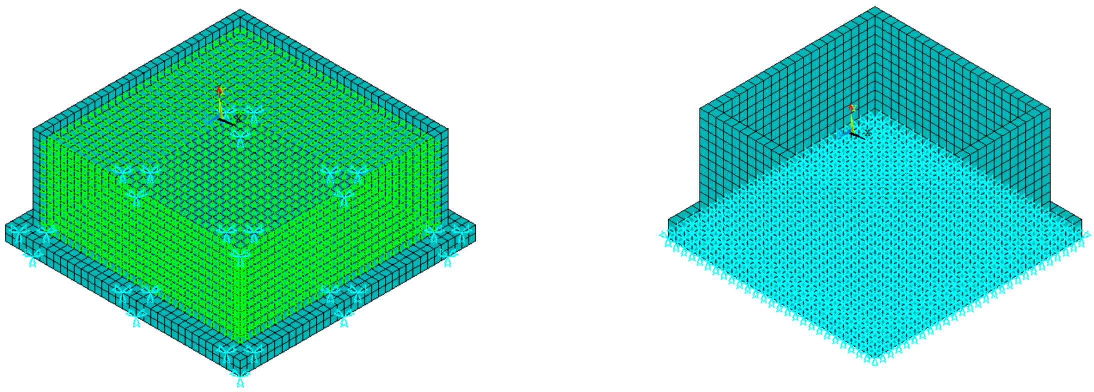
(ب) (الف)

شکل ۵ (الف) مشخصات هندسی مدل سه بعدی و (ب) مدل اجزای محدود دو بعدی پیشنهادی جداساز هسته سربی



(ب) (الف)

شکل ۶ (الف) مدل اجزای محدود سه بعدی جداساز هسته سربی و (ب) جانمایی جداسازها در کف مخزن



(ب) (الف)

شکل ۷ مدل اجزای محدود مخزن مکعبی در (الف) حالت خالی بدون جداساز، (ب) حالت پر جداسازی شده

آنالیز حساسیت و تعیین تعداد المان‌های مورد نیاز

برای رسیدن به دقت قابل قبول در حل مسائل عددی و جلوگیری از حجم محاسبات بالا، لازم است تعداد المان‌های مورد نیاز جهت مدل‌سازی سازه مورد نظر تعیین گردد. برای این منظور آنالیز حساسیت نسبت به یکی از پارامترهای موجود انجام می‌پذیرد. در این تحقیق برای مخزن خالی و مخزن حاوی آب، آنالیز حساسیت نسبت به متغیر تغییر مکان انجام شده و تعداد المان‌های مورد نیاز جهت کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت محاسبه گردیده است. با توجه به نتایج این آنالیز، در حالت مخزن خالی، المان به طول ۰/۵ متر و در حالت مخزن پر، المان‌های مخزن و سیال به طول ۱ متر قابل قبول بوده و سرعت و دقت قابل قبولی را نشان می‌دهند.

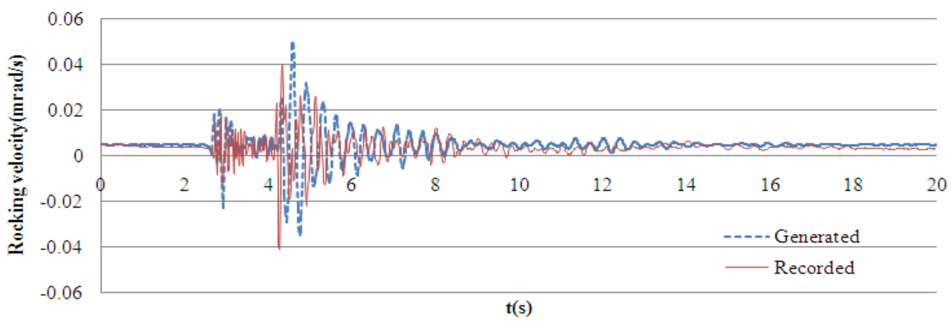
صحت‌سنجی

در این بخش از پژوهش حاضر صحت عملکرد برنامه مربوط به تولید مؤلفه دورانی زلزله در نرم‌افزار متلب و مدل‌سازی اجزای محدود مخازن و جداساز در نرم‌افزار انسیس به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

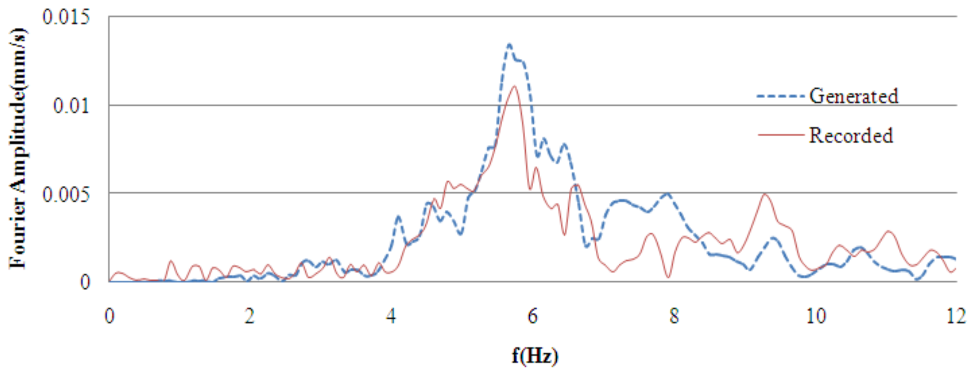
تولید مؤلفه دورانی

به‌منظور بررسی صحت عملکرد برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب برای تولید مؤلفه دورانی از داده‌های ثبت شده توسط شتاب‌نگارهای دورانی S-5-S استفاده شده است. این نوع شتاب-نگار، جدیدترین نوع شتاب‌نگارهای دورانی است که توسط کلب و همکاران [39] در منطقه کاروینا از کشور چک نصب و راه-اندازی شده و در سال ۲۰۱۱ اولین سری نتایج ثبت‌شده توسط آن، از آزمایش انفجار معدن استخراج گردیده است. این دستگاه علاوه بر ثبت سرعت و تغییر مکان انتقالی، دوران و سرعت زاویه‌ای حرکت زمین را نیز ثبت می‌کند که بیشترین مقدار ثبت شده توسط آن تا کنون در حدود ۱ $mrad/s^2$ و فاصله مرکز سطحی آن‌ها نیز در حدود ۲ الی ۱۰ km می‌باشد. شکل (۸) سرعت‌های انتقالی ثبت شده توسط لرزه‌نگار S-5-S و تولید شده در پژوهش حاضر و شکل (۹) طیف محتوای فرکانسی سرعت دورانی ثبت و تولید شده را نشان می‌دهد.

نتایج به‌دســـت آمده دارای ضـــریب همبســـتگی ۰/۸۳۳ می‌باشند که نشان دهنده تطابق و دقت نسبتا مناسب روش مورد استفاده در پژوهش حاضر می‌باشد.



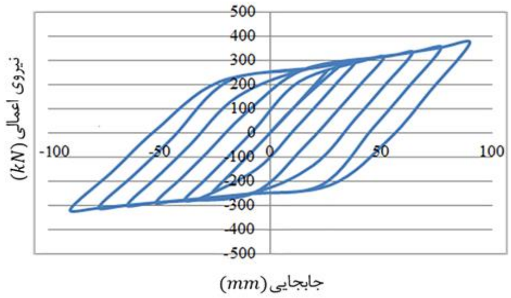
شکل ۸ تاریخچه زمانی سرعت دورانی به دست آمده در پژوهش حاضر و ثبت شده

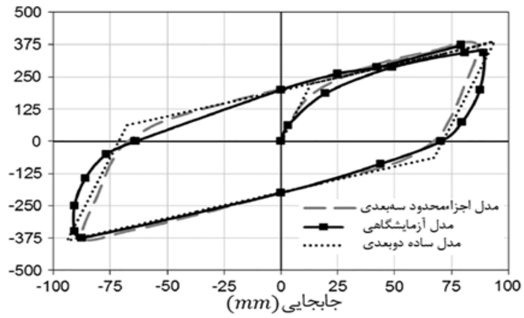


شکل ۹ طیف محتوای فرکانسی سرعت دورانی به دست آمده در پژوهش حاضر و ثبت شده

مدل اجزای محدود و عملکرد جداساز هسته سربی

در پژوهش حاضر به منظور کنترل صحت عملکرد مدل یک‌بعدی ارائه شده برای جداساز هسته سربی، منحنی هیسترزیس مربوط به المان میله و فنر معادل با منحنی هیسترزیس جدا ساز هسته سربی سه بعدی با مقیاس واقعی مطابق مرجع [32] مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج مطابق شکل (۱۰) نشان دهنده تطابق بسیار مناسب نتیجه مدل ساده ارائه شده در پژوهش حاضر با مدل سه بعدی جدا ساز هسته سربی می‌باشد.



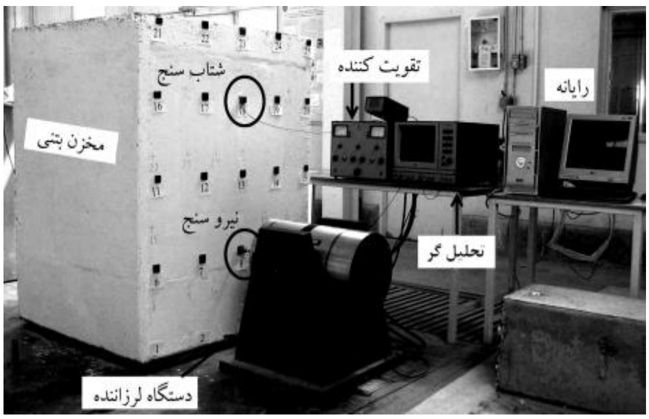


شکل ۱۰ منحنی هیسترزیس: (الف) جداساز هسته سربی با مقیاس واقعی و در حالت سه بعدی مرجع [32]، (ب) المان میله و فنر پژوهش حاضر

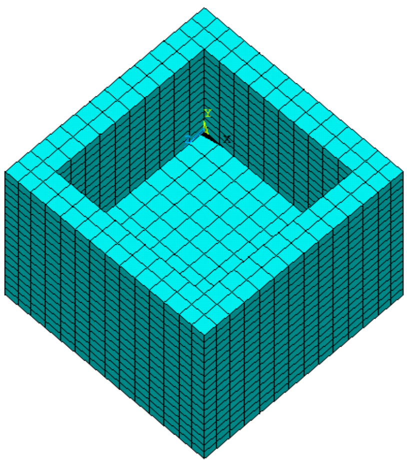
مدل‌سازی اجزای محدود مخازن

از آنجایی که دقت تحلیل دینامیکی مخازن ذخیره آب به رفتار ارتعاشی سیستم آب و سازه وابسته است، در این بخش به صحت‌سنجی رفتار ارتعاشی مخازن با نتایج مدل آزمایشگاهی و تحلیلی مرجع [40] پرداخته شده است. در این مرجع یک مخزن مکعبی بتنی به طول و عرض ۱/۳، ارتفاع ۱/۵ متر، ضخامت دیوار و کف ۱۶۵ میلی‌متر به‌صورت آزمایشگاهی و تحلیلی تحت آنالیز مودال قرار گرفته و مقادیر بسامدهای طبیعی مودهای اول و دوم ارتعاش آن برای حالت‌های مختلف تراز آب مخزن محاسبه شده است. در پژوهش حاضر به منظور صحت‌سنجی، یک مخزن مکعبی با مشخصات هندسی و مکانیکی مشابه مرجع [40] در نرم‌افزار انسیس مدل شده و مقادیر بسامدهای به‌دست آمده با نتایج این مرجع مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل (۱۱) مدل آزمایشگاهی مرجع [40] و مدل اجزای محدود پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

نتایج صحت‌سنجی تغییرات بسامد با تغییر ارتفاع آب مخزن در شکل (۱۲-الف) آمده است. همچنین شکل (۱۲-ب) نشان می‌دهد که تغییرات بسامد مود اول با تغییر تراز آب در مخازن ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر مکعبی پژوهش حاضر نیز از همین روند نزولی تبعیت می‌کند.

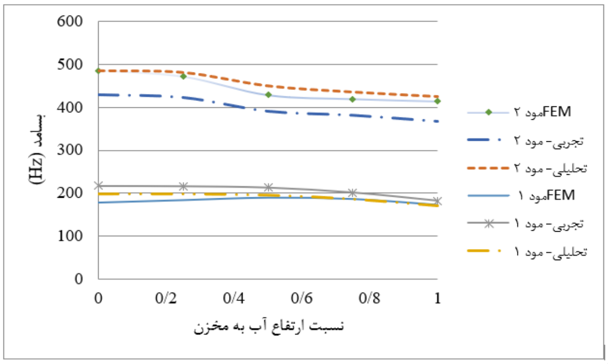


(الف)

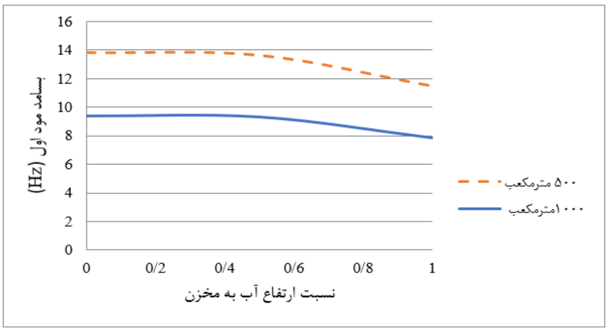


(ب)

شکل ۱۱ (الف) مدل آزمایشگاهی مرجع [40]، (ب) مدل اجزای محدود پژوهش حاضر در انسیس



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، (الف) مخزن با ابعاد مرجع [40]، (ب) مخازن ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر مکعبی مورد استفاده در پژوهش حاضر

مشخصات زلزله‌های مورد بررسی

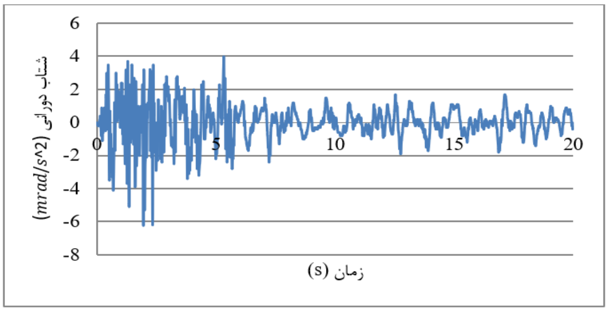
در پژوهش حا ضر از بین ۲۰ زوج شتاب‌نگا شت حوزه دور از گسل، سه زوج شتاب‌نگاشت مطابق جدول (۵) که دارای شتاب دورانی قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر شتاب‌نگاشت‌ها می‌باشند، استفاده شده است. فاصله مرکز سطحی این زلزله‌ها بیشتر از ۱۵ کیلومتر اســـت تا اثر عواملی مانند وجود حرکت پالس‌گونه با پریود بلند در ابتدای رکوردها و تجمع انرژی و انتقال آن در مدت زمان کوتاه تفاوت‌های حائز اهمیتی بر پاســـخ لرزه‌ای مخازن ایجاد نکند. بدین ترتیب امکان بررســـی دقیق‌تر تغییرات پاســـخ لرزه‌ای مخازن تحت اثر مؤلفه دورانی رکوردهای زلزله و حضور جدا ساز بدون تداخل اثرات حوزه نزدیک میسر خواهد شد. بیشترین مقادیر سرعت و شتاب دورانی سه زلزله مورد بررســـی و بســـامد غالب مؤلفه‌های انتقالی و دورانی آن‌ها در جدول (۶)، ارائه شـــده اســـت. به‌عنوان نمونه شـــتاب نگاشـــت تولیدشـــده مؤلفه دورانی زلزله السنترو در شـــکل (۱۳) آمده است.

جدول ۵ مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

زلزله (زمان وقوع)	ایستگاه	فاصله مرکز سطحی (km)	مؤلفه ثبت شده	PGA (g)	سرعت موج برشی (m/s)
السنترو (۱۹۵۱/۰۱/۲۴)	117 El Centro Array #9	۲۸/۲۴	قائم	۰/۰۱۳	۲۱۳/۴
			N – S	۰/۰۲۹	
تفت (۱۹۵۲/۰۷/۲۱)	Lincoln School Tunnel	۳۵/۰۰	قائم	۰/۱۰۵	۳۸۵/۴
			S69E	۰/۱۷۹	
طبس (۱۹۷۸/۰۹/۱۶)	Boshrooyeh	۷۴/۶۶	قائم	۰/۰۶۹	۳۳۸/۶
			طولی	۰/۱۰۹	

جدول ۶ بیشترین شتاب زاویه‌ای، سرعت زاویه‌ای و فرکانس غالب مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌ها

زلزله		السنترو	تفت	طبس
$\ddot{\theta}_{max}(\frac{mrad}{s^2})$		−۶/۱۷	۱۵/۶۰	−۱۰۸/۵۰
$\dot{\theta}_{max}\left(\frac{mrad}{s}\right)$		−۰/۰۳	−۰/۰۴	۰/۳۸
بسامد غالب (Hz)	مؤلفه قائم	۴/۴۵	۲/۳۰	۰/۹۰
	مؤلفه طولی	۲/۲۵	۴/۴۰	۷/۴۰
	مؤلفه گهواره‌ای	۱/۶۵	۱/۳۰	۰/۸۸



شکل ۱۳ شتاب‌نگاشت تولیدشده مؤلفه دورانی زلزله السنترو در پژوهش حاضر

نتایج تحلیل مودال

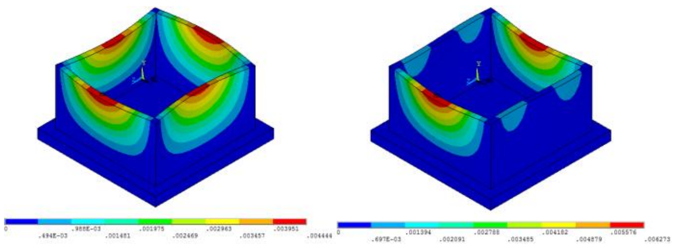
دوره تناوب دو مود اول ارتعاشی در تحلیل مودال مخازن مورد بررسی مطابق جدول (۷) و (۸) می‌باشد. ضرایب میرایی رایلی برای حالت‌های مختلف مخازن محاسبه و در این جداول ارائه شده است. شکل مودهای ارتعاشی مخزن در دو حالت خالی و پر نیز در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

جدول ۷ دوره تناوب دو مود اول ارتعاش و ضرایب میرایی رایلی مخزن مکعبی بدون جداساز

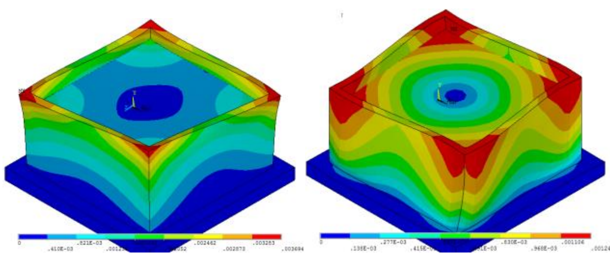
	مخزن $۵۰۰\ m^۳$			مخزن $۱۰۰۰\ m^۳$		
	پر	نیمه‌پر	خالی	پر	نیمه‌پر	خالی
مود ۱	۰/۰۸۷۲	۰/۰۷۳۵	۰/۰۷۲۵	۰/۱۲۶۸	۰/۱۰۷۵	۰/۱۰۶۷
مود ۲	۰/۰۳۴۵	۰/۰۲۸۹	۰/۰۲۸۶	۰/۰۵۹۲	۰/۰۴۹۶	۰/۰۴۹۲
a	۵/۱۶۰۰	۶/۱۴۰۰	۶/۲۶۰۰	۳/۳۸۰۰	۳/۹۹۰۰	۴/۰۵۰۰
b	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۵۳

جدول ۸ دوره تناوب دو مود اول ارتعاش و ضرایب میرایی رایلی با جداساز

	مخزن $۵۰۰\ m^۳$			مخزن $۱۰۰۰\ m^۳$		
	پر	نیمه‌پر	خالی	پر	نیمه‌پر	خالی
مود ۱	۰/۱۶۲۱	۰/۱۷۲۱	۰/۱۶۴۲	۰/۱۱۸۲	۰/۱۱۱۰	۰/۱۵۵۱
مود ۲	۰/۱۲۶۵	۰/۸۸۴۰	۰/۰۸۶۰	۰/۱۰۷۰	۰/۰۹۵۲	۰/۱۰۰۹
a	۲/۱۷۸۰	۲/۴۲۴۰	۲/۵۲۲۰	۲/۸۰۰۰	۳/۰۶۵۰	۲/۴۵۸۰
b	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۹۲	۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۰۰۹۷



(الف)



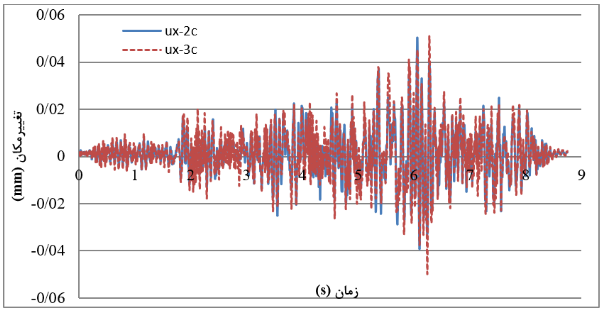
(ب)

شکل ۱۴ شکل دو مود اول ارتعاشی مخزن با تکیه‌گاه صلب، (الف) در حالت مخزن خالی، (ب) در حالت مخزن پر

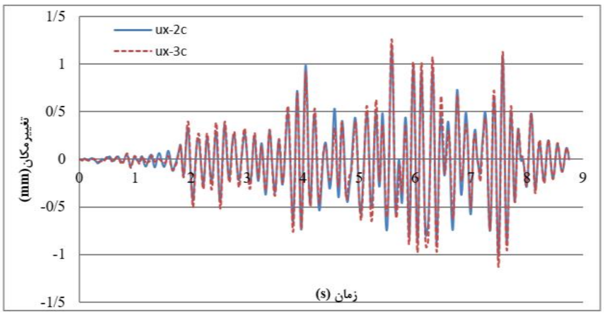
نتایج تحلیل دینامیکی

هدف این بخش از پژوهش، بررسی اثر حضور جداساز پایه بر تغییر مکان افقی، تنش بلندشدگی و نیروی برش پایه مخازن بتنی زمینی مکعبی با دو حجم ذخیره ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر مکعب در سه حالت خالی، نیمه‌پر و پر تحت اثر مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های دور از گسل است. برای استخراج نتایج این بخش، ۷۲ تحلیل دینامیکی غیر خطی در حالت سه بعدی انجام شده و تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی، تنش بلندشدگی و برش پایه مخازن استخراج شده است. از آنجایی که همواره طراحی سازه‌ها بر اساس بیشترین پاسخ ناشی از تحلیل صورت می‌پذیرد در هر حالت، بیشترین تغییر مکان افقی، تنش بلندشدگی و برش پایه مخزن محاسبه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

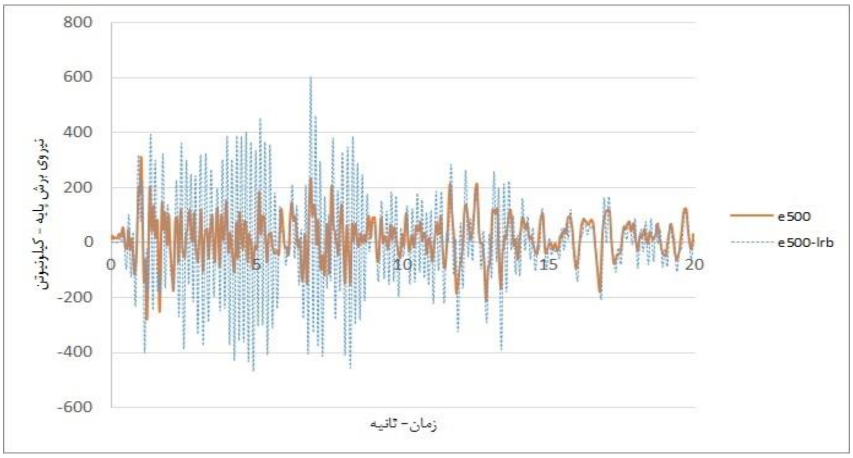
به‌عنوان نمونه نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی مخزن با حجم ۵۰۰ متر مکعب در حالت خالی تحت تحریک دو مؤلفه-ای و سه مؤلفه‌ای زلزله طبس در حالت با و بدون جداساز در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، نمودار تاریخچه زمانی نیروی برش پایه مخزن با حجم ۵۰۰ متر مکعب در حالت خالی، تحت تحریک دو مؤلفه‌ای زلزله السنترو در حالت‌های با و بدون به‌کارگیری جداساز در شکل (۱۷) و نمودار تاریخچه زمانی تنش بلندشدگی مخزن با حجم ۱۰۰۰ متر مکعب خالی در حالت‌های با و بدون به کارگیری جداساز تحت تحریک دومؤلفه‌ای زلزله تفت در شکل (۱۸) نشان داده شده است. نتایج مربوط به بیشترین تغییر مکان افقی برای مخازن مورد بررسی در جدول (۹)، مقادیر بیشترین نیروی برش پایه مخازن در جدول (۱۰) و بیشترین تنش قائم در کنج مخزن (نقطه A در شکل ۲–الف) در حالت‌های مختلف مورد بررسی در جدول (۱۱) ارائه شده است. در این جداول، 2C نتایج مربوط به تحلیل تحت دو مؤلفه انتقالی و 3C نتایج مربوط به تحلیل هم‌زمان تحت دو مؤلفه انتقالی و یک مؤلفه دورانی زلزله می‌باشد. لازم به ذکر است که مقادیر بیشینه در حالت‌های مختلف در زمان‌های مختلف اتفاق می‌افتد.



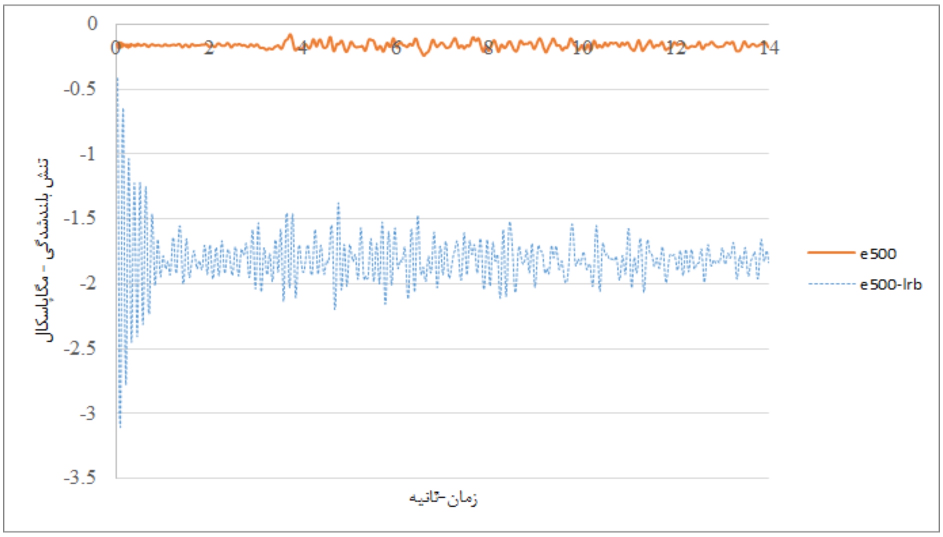
شکل ۱۵ تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی مخزن با حجم ۵۰۰ متر مکعب در حالت خالی و بدون جداساز– زلزله طبس



شکل ۱۶ تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی مخزن با حجم ۵۰۰ متر مکعب در حالت خالی و با جداساز– زلزله طبس



شکل ۱۷ تاریخچه زمانی برش پایه مخزن با حجم ۵۰۰ متر مکعب در حالت خالی تحت تحریک دو مؤلفه‌ای زلزله السنترو با و بدون جداساز



شکل ۱۸ تاریخچه زمانی تنش بلندشدگی مخزن با حجم ۵۰۰ متر مکعب در حالت خالی تحت تحریک دو مؤلفه‌ای زلزله تفت بدون جداساز (e500) و با جداساز (e500-lrb)

جدول ۹ بیشترین تغییر مکان افقی مخزن با و بدون جداساز (برحسب mm)

حجم m^3	مدل	زلزله	۲C		۳C	
			بدون جداساز	با جداساز	بدون جداساز	با جداساز
۵۰۰	مخزن خالی	السنترو	۰/۰۱۳	۰/۴۱۸	۰/۰۱۲	۰/۴۱۵
		طبس	۰/۰۵۰	۱/۱۶۱	۰/۰۵۱	۱/۱۲۶
		تفت	۰/۰۴۷	۱۶/۳۱۰	۰/۰۴۸	۱۶/۰۵۴
	مخزن نیمه‌پر	السنترو	۰/۱۴۰	۰/۵۹۰	۰/۱۳۰	۰/۵۹۰
		طبس	۰/۰۵۱	۱/۲۸	۰/۰۵۰	۱/۴۸۰
		تفت	۰/۰۵۴	۳/۱۹	۰/۰۵۳	۳/۱۸۱
	مخزن پر	السنترو	۰/۰۰۶۹	۵/۸۲۰	۰/۰۰۶۳	۶/۳۵۰
		طبس	۰/۰۴۱	۶/۳۹۱	۰/۰۳۹	۶/۴۰۱
		تفت	۰/۳۷۰	۱۸/۵۰۰	۰/۳۶۱	۱۸/۶۶۰
۱۰۰۰	مخزن خالی	السنترو	۰/۲۱۰	۰/۵۳۱	۰/۱۹۰	۰/۵۳۱
		طبس	۰/۰۶۱	۱/۰۲۵	۰/۰۶۱	۱/۲۱۰
		تفت	۰/۷۲۰	۲/۴۳۰	۰/۷۳۰	۲/۷۳۰
	مخزن نیمه‌پر	السنترو	۰/۲۲۱	۰/۵۲۰	۰/۲۱۱	۰/۵۳۱
		طبس	۰/۰۶۵	۰/۹۶۱	۰/۰۶۴	۱/۱۲۰
		تفت	۰/۰۷۶	۲/۴۶۰	۰/۰۷۵	۲/۴۵۰
	مخزن پر	السنترو	۰/۰۶۴	۰/۶۸۰	۰/۰۶۳	۰/۶۷۱
		طبس	۰/۱۷۰	۲/۴۰۰	۰/۱۶۰	۲/۳۱۰
		تفت	۰/۱۲۰	۸/۴۱۰	۰/۱۳۱	۸/۵۱۰

جدول ۱۰ بیشترین نیروی برش پایه مخزن با و بدون جداساز (برحسب N)

حجم m^3	مدل	زلزله	۲C			۳C		
			بدون جداساز	با جداساز	اختلاف	بدون جداساز	با جداساز	اختلاف
۵۰۰	مخزن خالی	السنترو	۳۱۰۷۷۲	۶۰۰۱۳۰	۱/۹۳	۲۶۱۹۸۰	۵۹۷۳۴۰	۲/۲۸
		طبس	۷۳۲۵۹۰	۱۲۷۱۵۰۰	۱/۷۳	۶۶۸۲۸۰	۱۳۱۲۱۰۰	۱/۹۶
		تفت	۱۴۵۴۴۰۰	۲۲۳۶۲۰۰	۱/۵۳	۱۴۵۲۹۰۰	۴۱۸۳۹۰۰	۲/۸۷
	مخزن نیمه‌پر	السنترو	۲۹۰۱۳۰	۶۰۹۱۹۰	۲/۰۹	۲۳۴۸۶۰	۵۵۳۵۶۰	۲/۳۵
		طبس	۵۰۰۹۸۰	۱۲۸۷۱۰۰	۲/۵۷	۳۴۸۶۳۰	۱۴۷۰۵۰۰	۴/۲۱
		تفت	۳۳۰۲۷۰	۲۲۴۴۳۰۰	۶/۷۹	۳۳۲۶۹۲	۲۳۵۶۵۱۵	۷/۰۸
	مخزن پر	السنترو	۶۷۲۲۸۰	۱۹۳۴۵۳۰	۲/۸۸	۶۳۹۶۴۰	۱۹۱۷۳۰۰	۲/۹۹
		طبس	۱۸۹۹۶۰۰	۳۸۳۳۶۰۰	۲/۰۲	۲۰۵۵۵۳۸	۳۹۸۱۱۲۸	۱/۹۳
		تفت	۴۱۱۴۲۰۰	۴۲۷۸۶۰۰	۱/۰۴	۴۱۰۳۵۰۰	۴۳۷۳۵۰۰	۱/۰۶
۱۰۰۰	مخزن خالی	السنترو	۴۱۳۰۳۰	۷۹۴۷۸۰	۱/۹۲	۴۰۸۵۵۰	۸۵۵۱۱۰	۲/۰۹
		طبس	۸۶۵۹۱۰	۲۲۳۰۰۰۰	۲/۵۸	۸۹۲۰۳۰	۲۲۵۲۴۰۰	۲/۵۲
		تفت	۲۰۲۷۹۰۰	۴۱۴۹۲۰۰	۲/۰۵	۲۰۳۷۶۰۰	۴۱۴۹۷۰۰	۲/۰۴
	مخزن نیمه‌پر	السنترو	۴۴۸۲۰۰	۸۹۹۵۲۰	۲/۰۱	۴۵۳۱۳۰	۸۹۴۶۸۰	۱/۹۷
		طبس	۹۸۳۵۳۰	۲۰۱۷۳۰۰	۲/۰۵	۱۰۲۸۷۰۰	۲۱۱۱۷۰۰	۲/۰۵
		تفت	۲۱۹۱۴۰۰	۴۱۱۰۱۰۰	۱/۸۷	۲۲۰۴۱۰۰	۴۱۰۵۶۰۰	۱/۸۶
	مخزن پر	السنترو	۵۹۰۰۵۰	۹۲۳۴۳۰	۱/۵۷	۶۵۴۹۹۳	۸۷۴۸۹۰	۱/۳۳
		طبس	۸۶۳۵۶۰	۲۰۷۶۰۰۰	۲/۴۰	۸۳۹۲۳۰	۲۱۶۹۴۰۰	۲/۵۸
		تفت	۲۵۸۷۲۰۰	۳۲۱۸۷۰۰	۱/۲۴	۲۶۰۶۶۰۰	۲۷۷۳۴۰۰	۱/۰۶

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، حضور جداساز در تمام حالات مورد بررسی سبب افزایش تغییر مکان افقی ماکزیمم در مخازن مکعبی زمینی می‌شود. میزان این افزایش با توجه به نوع زلزله و میزان آب درون مخزن متفاوت می‌باشد، به طوری که کمترین افزایش تغییر مکان در حالت نیمه‌پر مخازن اتفاق افتاده است. این موضوع را می‌توان به اثرات امواج سطحی ایجاد شده در حالت نیمه‌پر و فشارهای نوسانی ناشی از برخورد موج به دیواره مخزن نسبت داد. همچنین با افزایش حجم مخزن از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ متر مکعب میزان افزایش تغییر مکان افقی مخازن با حضور جداساز کمتر خواهد شد، که می‌تواند به‌دلیل وزن بیشتر مخازن بزرگ‌تر در حالت پر و ایجاد مقاومت در برابر حرکت جانبی جداساز ایجاد گردد.

علاوه بر این اثر مؤلفه دورانی بر بیشترین تغییر مکان افقی مخازن، در بعضی موارد روند افزایشی و در برخی موارد روند کاهشی را نشان می‌دهد، که میزان این افزایش یا کاهش در صورت حضور آب در مخزن بسیار ناچیز می‌باشد. بنابراین به طور کلی می‌توان بیان نمود که در صورت حضور آب در مخازن زمینی می‌توان از اثر مؤلفه دورانی بر پاسخ تغییر مکان مخازن صرف نظر نمود.

همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که حضور جداساز در تمامی حالت‌های مخزن زمینی مکعبی سبب افزایش مقادیر نیروی برش پایه و تنش بلندشدگی مخازن می‌شود. به طوری که در صورت استفاده از جداساز مقادیر نیروی برش پایه حدود ۴ برابر و مقادیر تنش‌های بلندشدگی نیز حدود ۸ الی ۲۳ برابر در حالت‌های مختلف مورد بررسی افزایش می‌یابد.

از آنجایی که فلسفه عملکرد جداسازها، کاهش پاسخ سازه‌ها

از طریق افزایش میرایی و همچنین افزایش زمان تناوب آن‌ها می‌باشد، دلیل نتایج فوق را می‌توان به پایین بودن زمان تناوب مخزن مکعبی زمینی و قرار گرفتن آن در بخش اول طیف پاسخ شتاب استاندارد ۲۸۰۰ نسبت داد. در این حالت مجهز نمودن مخزن به جداساز پایه منجر به افزایش دوره تناوب مخزن می‌شود به طوری که نقطه نظیر سازه با دوره تناوب جدید در بخش شتاب ثابت طیف قرار گرفته و پاسخ ماکزیمم سازه افزایش خواهد یافت. در این حالت نوع زلزله، ارتفاع آب درون مخزن و حجم مخزن بر میزان افزایش پاسخ ناشی از حضور جداساز تأثیرگذار خواهد بود. به طوری که در مخزن با حجم ۵۰۰ متر مکعب، با افزایش ارتفاع آب افزایش تنش بلندشدگی ناشی از حضور جداساز بیشتر خواهد شد. اما این روند در مخزن با حجم ۱۰۰۰ متر مکعب برعکس شده و افزایش ارتفاع آب سبب تضعیف اثر افزایشی حضور جداساز بر تنش بلندشدگی مخازن شده است. از آنجایی که وجود آب به‌ویژه در مخازن بزرگ‌تر در هنگام زلزله می‌تواند بر پاسخ لرزه‌ای مخازن بسیار تأثیرگذار باشد، بنابراین این موضوع با توجه به اثرات میراکنندگی انرژی زلزله توسط آب به علت اختلاف فاز حرکت سیال و سازه، اثرات اندرکنش آب و سازه و نیز اثرات امواج سطحی بر تنش‌های بلندشدگی قابل توجیه است.

جدول ۱۱ بیشترین تنش بلندشدگی مخزن با و بدون جداساز (برحسب N/m^2)

حجم m^3	مدل	زلزله	۲C			۳C		
			بدون جداساز	با جداساز	اختلاف	بدون جداساز	با جداساز	اختلاف
۵۰۰	مخزن خالی	السنترو	۲۲۵۶۰۳	۱۹۸۲۲۹۰	۸/۷۸	۲۲۵۵۸۷	۱۹۸۲۰۷۰	۸/۷۸
		طبس	۲۲۵۸۵۵	۱۹۸۲۷۶۰	۸/۷۷	۲۲۵۶۵۲	۱۹۸۲۱۸۰	۸/۷۸
		تفت	۲۳۰۲۷۰	۷۸۶۵۹۷۰	۳۴/۱۵	۲۳۰۴۲۰	۵۳۱۷۹۸۰	۲۳
	مخزن نیمه‌پر	السنترو	۲۲۶۷۴۷	۲۷۰۶۳۹۰	۱۱/۹۳	۲۴۶۷۳۰	۲۷۰۶۱۰۰	۱۰/۹۶
		طبس	۲۴۶۹۳۷	۲۷۰۷۰۷۰	۱۰/۹۶	۲۴۶۷۲۱	۲۷۰۷۱۰۰	۱۰/۹۷
		تفت	۲۵۴۱۸۱	۲۵۲۳۳۷۰	۹/۹۳	۲۵۴۳۴۵	۲۵۲۳۶۵۰	۹/۹۲
	مخزن پر	السنترو	۲۶۲۲۵۷	۵۵۴۰۵۶۰	۲۱/۱۳	۲۶۲۲۳۷	۵۹۵۹۱۹۰	۲۲/۷۰
		طبس	۳۱۰۲۶۷	۵۹۶۱۹۶۰	۱۹/۲۱	۳۱۱۵۱۷	۵۹۶۳۷۳۰	۱۹/۱۴
		تفت	۲۸۳۰۵۰	۵۶۶۱۲۷۰	۲۰/۰۰	۲۸۴۲۹۸	۵۶۴۸۰۰۰	۱۹/۸۷
۱۰۰۰	مخزن خالی	السنترو	۲۲۱۸۲۷	۳۳۸۰۵۶۰	۱۵/۲۴	۲۲۱۸۰۷	۳۳۸۰۰۶۰	۱۵/۲۴
		طبس	۲۲۲۰۶۷	۳۳۸۱۳۶۰	۱۵/۲۲	۲۲۱۸۳۰	۳۳۸۲۲۴۰	۱۵/۲۵
		تفت	۲۳۹۵۱۱	۳۱۰۱۰۹۰	۱۲/۹۵	۲۴۱۳۲۴	۳۰۹۶۱۵۰	۱۲/۸۳
	مخزن نیمه‌پر	السنترو	۲۰۳۷۳۳	۲۷۵۹۲۵۰	۱۳/۵۴	۲۰۳۷۱۶	۲۷۵۸۸۵۰	۱۳/۵۴
		طبس	۲۰۳۹۳۶	۲۷۶۰۰۲۰	۱۳/۵۳	۲۰۶۲۱۰	۲۷۶۱۰۶۰	۱۳/۳۹
		تفت	۲۲۱۵۴۰	۲۶۶۸۷۱۰	۱۲/۰۴	۲۲۳۱۶۵	۲۶۶۶۳۲۰	۱۱/۹۵
	مخزن پر	السنترو	۲۷۱۰۸۰	۳۴۷۳۷۱۰	۱۲/۸۱	۲۷۰۹۸۸	۳۴۷۳۲۰۰	۱۲/۸۲
		طبس	۳۱۲۷۳۴	۳۴۷۴۶۴۰	۱۱/۱۱	۳۰۴۲۱۴	۳۴۷۵۹۰۰	۱۱/۴۳
		تفت	۳۱۹۱۳۲	۳۳۱۴۵۰۰	۱۰/۳۹	۳۲۰۹۶۰	۳۳۱۲۶۴۰	۱۰/۳۲

همچنین نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد اثر مؤلفه دورانی زلزله بر پاسخ نیروی برش پایه و تنش بلندشدگی در مخازن زمینی مکعبی مورد بررسی در برخی موارد سبب افزایش و گاهی سبب کاهش پاسخ مخازن می‌شود، اما به طور کلی در اکثر حالات مورد بررسی تأثیر آن بر پاسخ مخازن ناچیز ارزیابی شده است. این اتفاق را می‌توان به دوره تناوب بسیار پایین مخازن زمینی و اختلاف قابل توجه فرکانس غالب مؤلفه‌های دورانی با فرکانس طبیعی مخزن نسبت داد. در صورت وجود آب در مخزن، به دلیل حضور مؤلفه دورانی، میزان این افزایش و یا کاهش پاسخ کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد، با این وجود در تعداد محدودی از موارد مورد بررسی در حالت مخزن خالی، در برخی موارد کاهش ۳۳ درصدی و در بعضی موارد افزایش ۸۰ درصدی پاسخ نیز مشاهده شده است. علت این امر را می‌توان به اثرات میراکنندگی ناشی از حرکت جرم قابل ملاحظه آب در حالت پر و نیمه‌پر در مقایسه با حالت خالی مخازن نسبت داد. با توجه به وجود جرم قابل ملاحظه آب درون مخزن در حالت پر و نیمه‌پر، فرکانس طبیعی ارتعاش مجموعه سازه و سیال و به تبع آن میرایی کل سیستم متفاوت از حالت مخزن خالی خواهد بود. بنابراین در حالت مخزن خالی، به دلیل کاهش قابل توجه جرم، فرکانس ارتعاش افزایش یافته و به فرکانس غالب مؤلفه‌های دورانی در برخی از زلزله‌ها نزدیک می‌شود. این عامل می‌تواند سبب پررنگ شدن اثر مؤلفه دورانی بر پاسخ مخازن خالی در این حالت‌ها گردد.

نتیجه‌گیری

۱. در کلیه حالت‌های مورد بررسی، حضور جداساز باعث افزایش تغییر مکان افقی ماکزیمم در مخازن مکعبی زمینی می‌شود. میزان این افزایش تغییر مکان، با توجه به نوع زلزله و میزان حجم آب درون مخزن متفاوت بوده و کمترین افزایش تغییر مکان در حالت نیمه‌پر مخازن اتفاق افتاده است.

۲. در صورت عدم استفاده از جداساز، با افزایش حجم مخزن از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ متر مکعب به دلیل ارتفاع امواج سطحی و اثر فشار ضربه‌ای آب بر دیواره، تغییرمکان ماکزیمم مخازن در اکثر موارد روند افزایشی دارد. اما در مخازن جداسازی شده، اثر فشار ضربه‌ای آب کم‌رنگ شده و با افزایش حجم مخزن، تغییر مکان ماکزیمم مخزن در حالت‌های نیمه‌پر و پر کاهش می‌یابد که این موضوع را می‌توان به اثرات وزن مخازن بر رفتار جداساز لرزه‌ای نسبت داد.

۳. حضور جداساز در مخازن زمینی مکعبی سبب افزایش حدود ۸ الی ۲۳ برابری تنش‌های بلندشدگی و افزایش حدود ۲ الی ۴ برابری نیروی برش پایه مخازن می‌شود که دلیل آن را می‌توان به زمان تناوب بسیار کم مخازن مکعبی زمینی و قرار گرفتن در قسمت جابه‌جایی ثابت طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ نسبت داد.

۴. ارتفاع آب درون مخزن و حجم مخزن بر میزان افزایش تنش بلندشدگی مخازن ناشی از حضور جداساز تأثیرگذار خواهد بود. به طوری که در مخزن با حجم ۵۰۰ مترمکعب، با افزایش ارتفاع آب افزایش تنش بلندشدگی ناشی از حضور جداساز بیشتر خواهد شد. اما این روند در مخزن با حجم ۱۰۰۰ مترمکعب برعکس شده و بیشترین افزایش ناشی از حضور جداساز بر تنش بلندشدگی در حالت مخزن خالی اتفاق می افتد.

۵. اثر مؤلفه دورانی بر تغییر مکان افقی، برش پایه و تنش بلندشدگی مخازن مکعبی زمینی، در برخی موارد روند افزایشی و در برخی موارد روند کاهشی را نشان می‌دهد. اما میزان این افزایش یا کاهش در صورت حضور آب در مخزن بسیار ناچیز و کمتر از ۱۰ درصد بوده است. بنابراین از آنجایی که مخازن آب معمولا در حالت پر یا نیمه‌پر قرار دارند، در حالت کلی می‌توان از اثر مؤلفه دورانی بر پاسخ لرزه‌ای مخازن مکعبی زمینی صرف نظر کرد.

۶. در صورت عدم حضور آب در مخزن، تغییرات پاسخ لرزه‌ای مخازن تحت اثر مؤلفه دورانی زلزله، در برخی موارد کاهش ۳۳ درصدی و یا افزایش ۸۰ درصدی نیز داشته است. علت این امر را می‌توان به حذف اثرات میراکنندگی و ضربه‌ای آب بر پاسخ دینامیکی مخازن خالی و غالب شدن اثر تشابه محتوای فرکانسی تحریک سه مؤلفه‌ای زلزله با فرکانس طبیعی مخازن در این موارد خاص نسبت داد.

سپاسگزاری

مراجع

[1] L. M. Hoskins, and L.S. Jacobsen, “Water Pressure in a Tank Caused by Simulated Earthquake,” *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 24, pp.1-10, 1934.

[2] L. S. Jacobsen, “Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 39, no. 3, pp.189-204, 1949.

[3] G. W. Housner, “Dynamic pressure on accelerated fluid containers,”*Bulletin of the seismological society of America*, vol. 47, no. 1, pp. 15-35, 1963.

[4] R.W. Clough, D. P. Clough, and A. Niwa, “Experimental seismic study of cylindrical tanks,” *Journal of the Structural Division*, vol. 105, no. 1/2, pp. 2565-2590, 1979.

[5] M.A. Haroun, and G.W. Housner, “Seismic Design of Liquid Storage Tanks,” *Journal Technical Councils*, ASCE, vol. 107, no. 1, pp. 191-207, 1991.

[6] S.C. Dutta, “Seismic torsional behaviour of elevated tanks for improved code provisions: elastic behaviour,” *Journal of the Institution of Engineers*, India, Civil Engineering Division, vol. 80(FEV), pp. 169-181, 2000.

[7] H. Shakib, F. Omidinasab, and M.T. Ahmadi, “Seismic demand evaluation of elevated reinforced concrete water tanks,” *International Journal of Civil Engineerng*, vol. 8, no. 3, pp. 204-220, 2010.

[8] F. Omidinasab, and H. Shakib, “Seismic response evaluation of the RC elevated water tank with fluid-structure interaction and earthquake ensemble,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 366-376, 2012.

[9] A. M. Jabar, and H.S. Patel, “Seismic behaviour of RC elevated water tank under different staging pattern and earthquake characteristics,” *International journal of advanced engineering research and studies (IJAERS)*, ISSN: 2249–8974, vol. 1, pp. 293-296, 2012.

[10] M. Khoubani, Sh. Hashemi, and A. Alipour, “Dynamic analysis of concrete rectangular tanks considering the effect of soil-structure-fluid interaction,” *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, vol. 5, no. 1, p. 189-209, 2018.

[11] S.O. Lakhade, and R. Kumar, ”Damage states of yielding and collapse for elevated water tanks supported on RC frame staging,” *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 67, no. 6, pp. 587-601, 2018.

[12] F. Rahimzadeh, and S. Bagheri K., “Dynamic Behavior of Flexible Ground Tanks,” *4th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran*, (2003), (In Persian).

[13] L. Kalani Sarokolayi, and B. Navayi Neya, “Evaluation of modification factor for concrete cylindrical tanks using pushover analysis,” *Journal of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad*, vol. 23, no. 2, pp. 53-57, 2012.

[14] L. Kalani Sarokolayi, B. Navayi Neya, and J. Vaseghi Amiri, and H.R. Tvakoli, “Seismic Analysis Of Elevated Water Storage Tanks Subjected To Six Correlated Ground Motion Components,” ISSN: 2079-2115, (2013).

[15] A. S. Ghods, and M. R. Esfahani, “The Effect of Wall Cross Section and Damping Ratio on Seismic Responses of Rectangular Water Storage Tanks,” *Journal of civil and environmental engineering, Tabriz University*, 2013, (In Persian).

[16] N. M. Newmark, “Torsion in Symmetrical Buildings,” *Proceeding of the 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, A3, pp. 19-23, 1969.

[17]M.D. Trifunac, "A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body waves,"*Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 11-19, 1982.

[18]V. W. Lee, and M. D. Trifunac, "Rocking strong earthquake accelerations," *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 75-89, 1987.

[19]V. W. Lee, and L. Liang, "Rotational components of strong motion earthquakes," *14th world conference on earthquake engineering*, Beijing, China, (2008).

[20] H. N. Li, L. Y. Sun, and S. Y. Wang, "Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 232, no. 2, pp. 131-137, 2004.

[21] L. Kalani Sarokolayi, B. Navayi Neya, and H.R. Tavakoli, "RotationalComponents Generational of Earthquake Ground Motion Using TranslationalComponents," *15WCEE*, Lisbon, (2012).

[22] L. Kalani Sarokolayi, "Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams under Spatial Varying Transitional and Rotational Components of Earthquakes," *Phd thesis, Babol Noushirvani University of Technology*, 2013, (In Persian).

[23]M. Ghafory-Ashtiani,and M. P. Singh, "Structural response for six correlated earthquake components," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 14, no. 1, pp. 103-119, 1986.

[24]S. Harischian, and H. Shakib, "Investigation of Methods of Generating Rotational Components of Earthquakes and Evaluating Their Effect on Structure Behavior," *Annual Conference on Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning and Sustainable Environment*, Tehran, (2015), (In Persian).

[25]F. Dadpanah, "Dynamic Analysis of Framed Concrete Elevated tanks Considering Soil- Fluid -Structure Interaction," M.S thesis, Babol Noushirvani University of Technology, 2020 (In Persian).

[26]H. W. Shenton III, and F. P. Hampton, "Seismic response of isolated elevated water tanks," *ASCE Journal of Structal Engineering*, vol. 125, no. 9, pp. 965–76, 1999.

[27]M.K. Shrimali, and R.S. Jangid, " Seismic response of liquid storage tanks isolated by sliding Bearings," *Journal Engineering Structures*, vol.24, pp. 909-921, 2001.

[28]M. K. Shirmali, and R. S. Jangid, " The seismic response of elevated liquid storage tanks isolated by lead-rubber bearings," *Bull NZ Soc Earthquake Eng*, pp. 41–64, 2003.

[29]M.K. Shrimali, and R.S. Jangid, " Earthquake Response ofIsolated Elevated Liquid Storage Steel Tanks," *Journal of Constructional Steel Research*, vol.59, pp.1267- 1288-119, 2003.

[30]M.K. Shrimali, and R.S. Jangid, "Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks," *Department of Civil Engineering*, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai 400076, India, (2003).

[31]M.R. Shekari, N. Khaji, and M.T. Ahmadi, "On the seismic behavior of cylindrical baseisolated liquid storage tanks excited by long-period ground motions," *journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 30, pp. 968-980, 2010.

[32]M. Moslemi, and M. R. Kianoush, " Application of seismic isolation technique to partially filled conical elevated tanks," *Engineering Structures*, vol. 127, pp. 663–675, 2016.

[33]L. Kalani Sarokolayi, L. Khanmohammadi, and B. Navayi Neya, " Effect Of Base Isolation On Seismic Response Of

Concrete Elevated Tanks Subjected To Both Translational And Rotational Components Of Far And Near-Field Earthquakes," Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE), vol. 37.2, no. 3.2, pp. 59-71, 2021 (In Persian).

[34]Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings, Code No. 523, *Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision*, Iran, 2010 (In Persian).

[35]R. W. Ogden, "Nonlinear elastic deformations", *Dover Publications Inc*, 1984.

[36]R. W. Ogden, " Recent advances in the phenomenological theory of rubber el," *J Rubber Chem Technol*, vol. 59, pp. 361-383, 1986.

[37] L. R. G. Treloar, " Stress-strain data for vulcanized rubber under various types of deformations," *Trans Faraday Soc*, vol. 40, pp. 59–70, 1944.

[38] L. R. G. Treloar, " The physics of rubber elasticity," Oxford: Clarendon Press, 1975.

[39]Z. Kalab, and J. Knejzlik, " Examples of rotational componen records of mining induced seismic events from the Karvina region," *ACTA Geodynamicia and Geomaterialia*, vol. 9, no. 2, pp. 173-178, 2012.

[40] A.S. Ghods, M. R. Esfahani, A.H. Keivani, " Free Vibration Of Rectangular Concrete Liquid Storage Tanks: Expriments and Finilte Element Analysis," *Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE)*, vol. 28.2, no. 4, pp. 105-113, 2013 (In Persian).